



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-14-22>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.86

ГИРОТРОНЫ С КОНУСООБРАЗНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ

КОЛОСОВ С.В., ЗАЙЦЕВА И.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 25 февраля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Произведено сравнение эффективности цилиндрического, конического и биконического типов резонаторов гиротронов. По результатам сравнения трех исследуемых вариантов профиля гиротрона были сделаны выводы, что наименее эффективным является профиль регулярного типа. Данный вид резонатора позволил достичь уровня коэффициента полезного действия лишь в 23 %. Повысить коэффициент полезного действия в гиротронах с регулярным волноводом можно только за счет наличия нескольких мод или с помощью рекуперации электронов на коллекторе. Средним вариантом по коэффициенту полезного действия является биконический профиль резонатора. Его коэффициент полезного действия получился равным 42 %. При проведении научного исследования было выявлено увеличение коэффициента полезного действия для гиротронов с коническими резонаторами с 23 до 50 % на волне TE_{01} . Стоит отметить, что для получения такого коэффициента полезного действия необходимо производить группировку электронов по фазе в нарастающем высокочастотном поле посредством электромагнитного поля с дальнейшим отбором энергии у электронного потока в сильном спадающем электромагнитном поле. Коэффициент полезного действия, достигающий 50 %, существенно выше коэффициента полезного действия гиротрона с регулярным профилем резонатора ~30 %. Коэффициент полезного действия гиротрона для профиля волновода с коническим резонатором и с рекуперацией на коллекторе может достигать уровня в 80 %. Для проведения расчетов использовался программный комплекс КЕДР, в частности, оптимизация параметров гиротронов проводилась с помощью программного продукта GYRO-K. Данный программный продукт имеет ряд преимуществ перед другими подобными программными продуктами, основанных на «PIC» коде. GYRO-K позволяет получить высокую скорость сходимости при решении краевых задач, а также решать задачу оптимизации профиля волновода гирорезонансных приборов за приемлемое время счета. Гиротроны на коническом резонаторе могут найти широкое применение в промышленности при создании эффективных гиротронов для спектроскопии, диагностики различных сред и для технологических нужд.

Ключевые слова: гиротрон, нерегулярные волноводы, возбуждение нерегулярных волноводов, самосогласованная задача.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Колосов С.В., Зайцева И.Е. Гиротроны с конусообразными резонаторами. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 14-22.

GYROTRONES WITH CONE-SHAPED RESONATORS

STANISLAV V. KOLOSOV, IRINA E. ZAITSEVA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 25 February 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper we compared the efficiency of the cylindrical, conical, and biconical types of gyrotron resonators. Based on the results of comparing the three studied variants of gyrotron profile, it was concluded that the regular-type profile is the least efficient. This type of a resonator made it possible to achieve the level of efficiency of only 23 %, which can be increased in the regular-waveguide gyrotrons only through several modes or by recovering the electrons on the collector. The medium efficiency option is the biconical profile of the resonator. Its efficiency accounted for 42 %. Through a scientific study we revealed an increase in the efficiency for gyrotrons with conical resonators from 23 to 50 % in the TE_{01} wave. It is worth mentioning that obtaining such efficiency requires phase grouping of the electrons in an increasing high-frequency field by means of an electromagnetic field with further selection of energy from the electron beam in a strong decaying electromagnetic field. The efficiency of 50 % exceeds significantly that of a gyrotron with a regular cavity profile of ~30 %. The gyrotron efficiency for a waveguide profile with a conical resonator and with recovery on the collector can reach 80 %. To carry out the calculations, the KEDR software package was used, and the optimization of the gyrotron parameters, in particular, was carried out using the GYRO-K software. This software has several advantages over other similar options based on the “PIC” code. GYRO-K makes it possible to obtain a high convergence rate when solving boundary value problems, as well as to solve the problem of optimizing the waveguide profile of gyroresonance devices with an acceptable computational burden. Conical cavity gyrotrons can be widely used in industry to create effective gyrotrons for spectroscopy, diagnostics of various media, and for technological needs.

Keywords: gyrotron, irregular waveguides, excitation of irregular waveguides, self-consistent problem.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kolosov S.V., Zaitseva I.E. Gyrotrons with cone-shaped resonators. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 14-22.

Введение

Обзор современного состояния гиротронов для технологических нужд средней мощности порядка нескольких киловатт, приведенный в [1] (табл. 17), показывает, что средний КПД составляет 20–30 %. В обычных гиротронах без рекуперации электронов на коллекторе КПД не превышает 30 % (см. [2, 3]). С рекуперацией на коллекторе возможно достижение полного КПД до 70 % (см. [4]). В обычных гиротронах с регулярным волноводом продольное распределение высокочастотного (ВЧ) поля имеет синусоидальный характер, что не соответствует оптимальному распределению поля, а на модах с более высокими индексами нельзя уже управлять продольным распределением ВЧ поля в пределах одной вариации. Повысить КПД можно в гиротронах с регулярным волноводом только за счет наличия нескольких мод или рекуперацией электронов на коллекторе. КПД гиротрона существенно зависит от рабочей частоты, так как сильно возрастают омические потери в стенках волновода с увеличением частоты, и питч-фактора, так как в гиротронах происходит отбор только поперечной энергии вращения электронов. В работе [5] на волне TE_{01} на частоте 35 ГГц достигнут КПД 23,7 %, что почти соответствует расчетным данным, полученным авторами. На более высоких частотах КПД гиротрона понижается, например, в [6, 7] на частоте 94 ГГц КПД уже составляет 20 %. Чтобы добиться больших значений КПД гиротрона с цилиндрическим резонатором на волне H_{01} , на первой гармонике циклотронной частоты

необходимо достичь высокой плотности фазового сгустка электронов путем фазовой группировки спирализированного электронного пучка посредством постепенного увеличения уровня высокочастотного электромагнитного поля. Чтобы предотвратить разгруппировку электронного сгустка по фазе и по остаточной энергии, необходимо организовать отбор энергии у электронов на небольшой длине в сильном электромагнитном поле, так как некоторые электроны, если произойдет их попадание в ускоряющую фазу поля, могут забрать у электромагнитного поля энергию обратно.

Методика проведения эксперимента

Для расчетов и оптимизации гиротронов была использована компьютерная программа GYRO-K из программного комплекса КЕДР [8]. В ней уравнения возбуждения нерегулярного волновода электронным потоком построены на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова [9, 10]. Он состоит в замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с радиусом волновода равным единице. Была использована система криволинейных координат (ρ, φ, s) вместо обычных полярных координат (r, φ, z) . В данной криволинейной системе единичные направляющие вектора по этим координатам определены как:

$$a_\rho = b \times r_0, \quad a_\varphi = \rho \cdot b \cdot \varphi_0, \quad a_s = \rho \cdot \frac{\partial b}{\partial z} \cdot r_0 + z_0, \quad (1)$$

где b – внутренний радиус волновода.

Уравнения Максвелла в ковариантной форме для координат (ρ, φ, s) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{rot} H' &= \varepsilon_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial E'}{\partial t} + \hat{g} \cdot J', \\ \text{rot} E' &= -\mu_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial H'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Метрический тензор:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 + \rho^2 \cdot \left(\frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \right)^2 & 0 & -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} & 0 & \bar{b}^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\rho = r/b$, $\bar{b} = 2\pi b/\lambda_0$, $z = 2\pi Z/\lambda_0$.

Уравнение боковой поверхности рассматриваемого волновода в системе координат (ρ, φ, s) – $\rho = 1$. В работе был использован метод Галеркина для решения уравнений Максвелла. Он позволяет свести трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода к одномерной. В программе применены релятивистские уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле нерегулярного волновода и неоднородном магнитостатическом поле. В полученной математической модели учитываются омические потери в стенках волновода, исходя из граничных условий Щукина – Леонтовича. Был использован итерационный метод последовательной нижней релаксации для нахождения самосогласованного решения задачи возбуждения волновода, а также для получения уравнений движения электронов в заданных электромагнитных полях.

Исследование регулярного резонатора

Для регулярного волновода определены следующие исходные данные: нормированный радиус волновода $g = 2\pi R/\lambda_0 = 3,863$ для волны TE_{01} , длина профиля $l = 2\pi L/\lambda_0 = 65$.

Для повышения добротности резонатора в конце волновода используется короткий сужающийся участок профиля. Для определения собственной добротности резонатора была просчитана его частотная характеристика, и она показана на рис. 1.

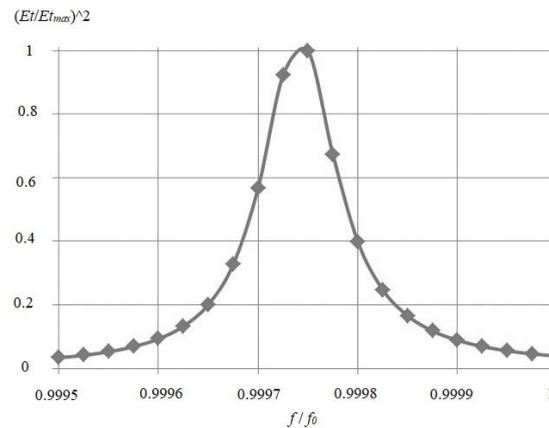


Рис. 1. Частотная характеристика регулярного резонатора
Fig. 1. Frequency response of a regular resonator

Собственная добротность такого резонатора составляет $Q = f_0 / \Delta f = 8333$, где $f_0 / \Delta f$ определяется по уровню 0,5.

Было принято, что нормированное значение магнитостатического поля равно $F(z) = \frac{\mu_0 \cdot e \cdot H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 1,044$, нормированное значение тока –

$\sigma = \frac{\eta_0 \cdot \mu_0}{c} \cdot I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} \cdot I_0 [A] = 0,0000055$ ($I=7,4$ мА), питч-фактор равен $q = \frac{V_{\perp}}{V_z} = 1,5$,

нормированная начальная скорость электронного потока определена равной

$\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1,957 \cdot 10^{-6} \cdot V_0 [v] + 1)^2}} = 0,319$ ($V = 28$ кВ), а рабочая частота равна $f = 30$ ГГц.

Получить КПД гиротрона $\eta = 23\%$ позволила оптимизация значений магнитостатического поля и тока электронного потока.

Взаимодействие электронного потока с ВЧ полем резонатора отображено на рис. 2.

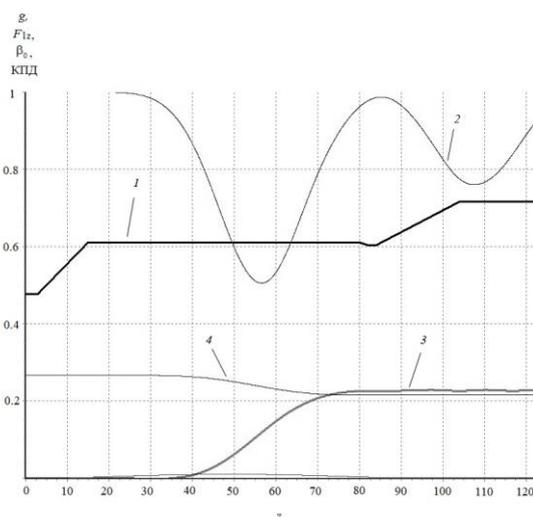


Рис. 2. Интегральные характеристики регулярного резонатора (1 – профиль резонатора $g/2\pi$, 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, 3 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, 4 – КПД)

Fig. 2. Integral characteristics (1 – resonator profile $g/2\pi$, 2 – electron grouping function according to the first harmonic, 3 – normalized transverse averaged electron velocity, 4 – efficiency)

На рис. 3 изображено, как распределена электрическая составляющая ВЧ электромагнитного поля в продольном разрезе резонатора. Картина распределения ВЧ электрического поля по продольной координате близка к синусоидальной.

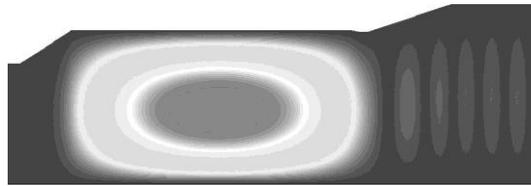


Рис. 3. Продольное распределение электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в волноводе
Fig. 3. The longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in the waveguide

Исследование конического резонатора

Профиль конического резонатора имеет профиль с параметрами: $g = 3,81$ слева и $g = 3,85$ справа. Длина резонатора $l = 65$. Собственная добротность $Q = 2083$ (рис. 4).

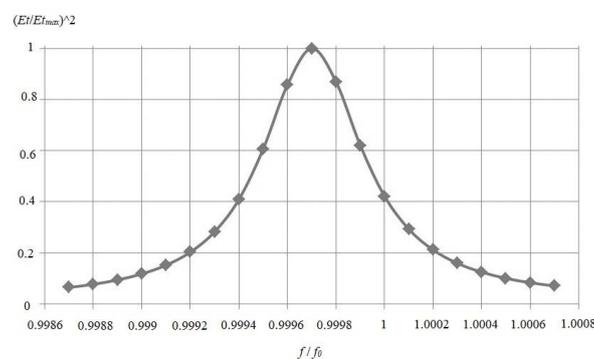


Рис. 4. График зависимости амплитуды от частоты резонатора конического типа
Fig. 4. Amplitude-frequency dependence of a conical resonator

На рис. 5 представлены интегральные характеристики конического резонатора.

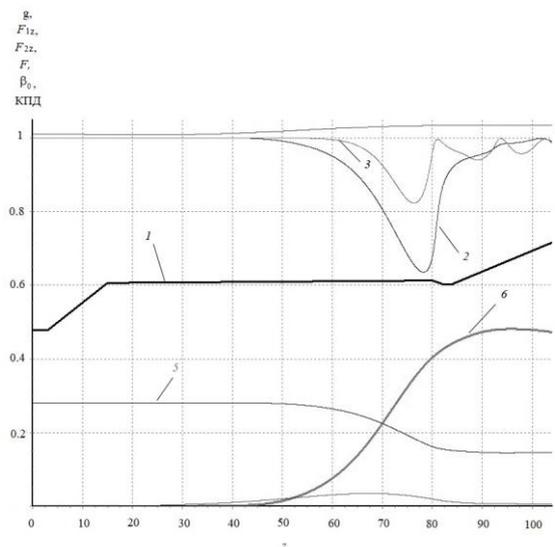


Рис. 5. Интегральные характеристики конического резонатора (1 – профиль резонатора $g/2\pi$, 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, 3 – функция группировки по второй гармонике циклотронной частоты, 4 – значение нормированного магнитостатического поля, 5 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, 6 – КПД)

Fig. 5. The integral characteristics of the conical resonator (1 – resonator profile $g/2\pi$, 2 – electron grouping function by the first harmonic, 3 – grouping function by the second harmonic of the cyclotron frequency, 4 – value of the normalized magnetostatic field, 5 – normalized transverse averaged velocity electrons, 6 – efficiency)

Уровень КПД гиротрона данного типа достигает 50 %. Для создания условий получения такого КПД необходим ток $\sigma = 0,0001587$ ($I = 215$ мА).

На рис. 6 изображена картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ поля в коническом резонаторе.

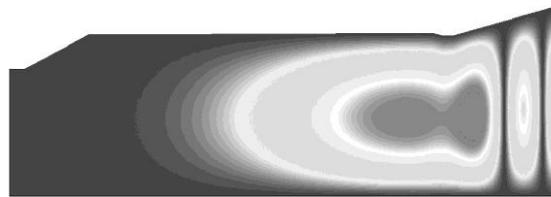


Рис. 6. Картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в коническом резонаторе

Fig. 6. A picture of the longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in a conical resonator

Из рисунка видно, что максимум электромагнитного ВЧ поля сосредоточен в конце конического резонатора, что и позволяет добиться таких высоких показателей КПД данного типа гиротрона.

Исследование биконического резонатора

Проведено исследование вариации гиротрона с биконическим резонатором. Часть резонатора – расширяющийся конус, до этого расположен сужающийся участок профиля в виде конуса. На рис. 7 представлены интегральные характеристики биконического резонатора.

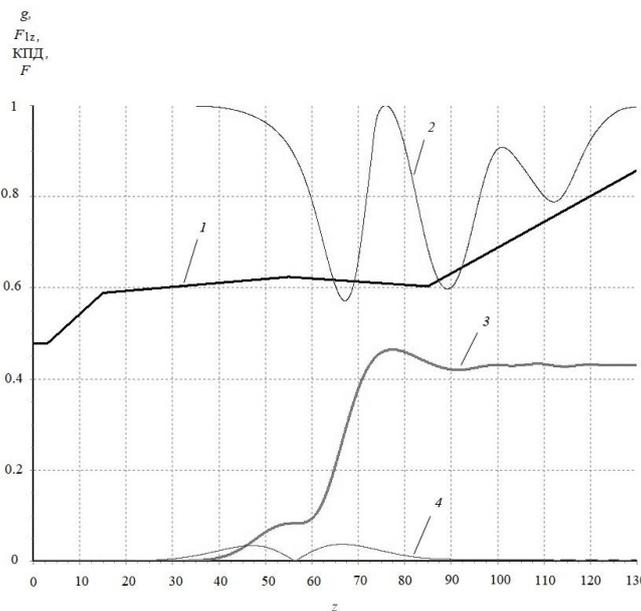


Рис. 7. Интегральные характеристики биконического резонатора (1 – профиль резонатора, 2 – функция группировки по первой гармонике циклотронной частоты, 3 – КПД, 4 – нормированная напряженность ВЧ электрического поля)

Fig. 7. Integral characteristics of a biconical resonator (1 – resonator profile, 2 – grouping function according to the first harmonic of the cyclotron frequency, 3 – efficiency, 4 – normalized RF electric field strength)

На рис. 8 изображена картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ поля в биконическом резонаторе.

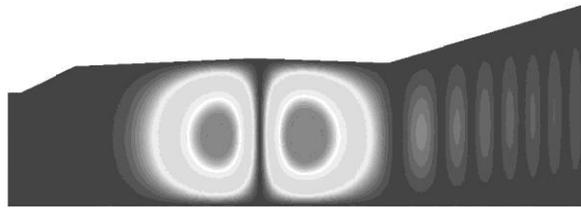


Рис. 8. Картина продольного распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в резонаторе биконического типа

Fig. 8. Longitudinal distribution of the electrical component of the RF electromagnetic field in a biconical cavity

Уровень собственной добротности равен $Q = 4000$. Питч-фактор равен $q = 1,84$, а рабочий ток составляет $\sigma = 0,0000588$ ($I = 79$ мА). Как следует из рис. 8, в резонаторе биконического типа ведущая мода имеет двугорбый профиль, что дает возможность провести параллель с двухкаскадным гироклистроном. Коэффициент полезного действия исследуемого биконического резонатора составляет 42 %. Из этого можно сделать вывод, что биконический резонатор имеет более высокий КПД по сравнению с регулярным резонатором, но уступает по коэффициенту полезного действия гиротрону с коническим профилем.

Заключение

В данной работе проведено исследование влияния типа профиля резонатора гиротрона на его коэффициент полезного действия. Сделаны выводы, что можно добиться более высоких показателей КПД (50 %) с помощью резонатора конического типа. По результатам сравнения трех исследуемых вариантов профиля гиротрона видно, что наименее эффективным является профиль регулярного типа, так как он позволил достичь уровня КПД лишь в 23 %. Средним вариантом по КПД является биконический профиль резонатора. Его КПД получился равным 42 %. Использование гиротрона конического типа с рекуперацией на коллекторе поможет достичь КПД в 80 %. Результаты данной работы могут быть использованы при создании эффективных гиротронов для спектроскопии, диагностики различных сред и для технологических нужд.

Список литературы

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7717. 2015; 174. DOI: 10.5445/KSP/1000055471.
2. Savilov A.V., Glyavin M.Yu., Philippov V.N. The multi-mode gyrotron. *Physics of plasmas*. 2011;18(10): 104502-104502-4. DOI: 10.1063/1.3644490.
3. Zavol'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of axial misalignment of the electron beam and cavity on the gyrotron parameters. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011;54:402-408. DOI: 10.1007/s11141-011-9300-x.
4. Zapevalov V.E., Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54:8-9. DOI: 10.1007/s11141-012-9326-8.
5. Chen N.C., Yu C.F., Yuan C.P., Chang T.H. A mode-selective circuit for TE01 gyrotron backward-wave oscillator with wide-tuning range. *Applied Physics Letters*. 2009;94:101501. DOI: 10.1063/1.3097236.
6. Chang T.H., Yu C.F., Hung C.L., and etc. W-band TE01 gyrotron backward-wave oscillator with distributed loss. *Physics of Plasmas*. 2008;15(7):5073105 (1-6). DOI: 10.1063/1.2950305.
7. Du C-H, Qi X-B, Liu P-K. Theory and experiment of a W-band tunable gyrotron oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6): 1781-1788. DOI: 10.1109/TED.2013.2294689.
8. Колосов С.В., Зайцева И.Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ. *СВЧ электроника*. 2017;2:46-48.
9. Свешников А.Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1963;3(2):314-326. DOI: 10.1016/0041-5553(63)90027-2.
10. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок. *Техника и приборы СВЧ*. 2009;2:8. DOI: 10.15407/rej2015.02.068.

References

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7717. 2015; 174. DOI: 10.5445/KSP/1000055471.
2. Savilov A.V., Glyavin M.Yu., Philippov V.N. The multi-mode gyrotron. *Physics of plasmas*. 2011;18(10): 104502-104502-4. DOI: 10.1063/1.3644490.
3. Zavol'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of axial misalignment of the electron beam and cavity on the gyrotron parameters. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011;54:402-408. DOI: 10.1007/s11141-011-9300-x.
4. Zapevalov V.E. Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54:8-9. DOI: 10.1007/s11141-012-9326-8.
5. Chen N.C., Yu C.F., Yuan C.P., Chang T.H. A mode-selective circuit for TE₀₁gyrotron backward-wave oscillator with wide-tuning range. *Applied Physics Letters*. 2009;94:101501. DOI: 10.1063/1.3097236.
6. Chang T.H., Yu C.F., Hung C.L., and etc. W-band TE₀₁ gyrotron backward-wave oscillator with distributed loss. *Physics of Plasmas*. 2008;15(7):5073105(1-6). DOI: 10.1063/1.2950305.
7. Du C-H, Qi X-B, Liu P-K. Theory and experiment of a W-band tunable gyrotron oscillator. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014;61(6):1781-1788. DOI: 10.1109/TED.2013.2294689.
8. Kolosov S.V., Zaitseva I.E. [GYRO-K computer program for the development and design of microwave gyroresonance devices]. *SVCH elektronika = Microwave electronics*. 2017;2:46-48. (In Russ.)
9. Sveshnikov A.G. [To the justification of the method for calculating the propagation of electromagnetic waves in irregular waveguides]. *Jurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(2):314-326. DOI: 10.1016/0041-5553(63)90027-2. (In Russ.)
10. Kolosov S.V., Kuraev A.A., Sen'ko AV. [Microwave equipment and devices]. *Technika i pribory SVCH = Microwave Equipment and Instruments*. 2009;2:8. DOI: 10.15407/rej2015.02.068. (In Russ.)

Вклад авторов

Колосов С.В. поставил задачу по повышению электронного КПД в гиротронах путем фазовой группировки электронного потока в слабом нарастающем ВЧ электромагнитном поле и отбора энергии у электронного потока в сильном резко спадающем поле при использовании конусообразных резонаторов.

Зайцева И.Е. произвела расчеты гиротронов с конусообразными резонаторами по программе GYRO-K и показала, что такие гиротроны позволяют повысить КПД с 23 до 50 %.

Authors contribution

Kolosov S.V. has set the task of increasing the electronic efficiency in gyrotrons by phase grouping the electron beam in a weak increasing RF electromagnetic field and taking energy from the electron beam in a strong sharply decaying field, which can be done using cone-shaped resonators.

Zaitseva I.E. performed calculations of gyrotrons with cone-shaped resonators using the GYRO-K program and showed that such gyrotrons can increase the efficiency from 23 to 50 %.

Сведения об авторах

Колосов С.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Зайцева И.Е., ассистент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kolosov S.V., D.Sci., Professor of Department of computational methods and programming of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zaitseva I.E., assistant of Department of computational methods and programming of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375-17-293-89-56;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Колосов Станислав Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Kolosov Stanislav Vasilyevich